〈特集：ICRP の新しい内部被ばく・外部被ばく線量係数
—その放射線管理への適用を考える〉

新しい外部被ばく線量換算係数の放射線管理への 適用とその問題点

吉澤道夫^{*1}

Some Issues on Application of New Dose Conversion Coefficients for External Radiation to Radiation Control

Michio YOSHIZAWA^{*1}

1. はじめに

国際放射線防護委員会(ICRP)は、ICRP 1990 年勧告¹⁾で変更された線量概念に基づく外部被ばく線量評価のための線量換算係数を ICRP Publication 74²⁾(以下 Publ. 74 のように記す)として出版した。Publ. 74 で示された外部被ばく線量換算係数は、大きく分けて2種類ある。一つは防護量(protection quantity; 臓器線量及び実効線量)への換算係数であり、もう一つは国際放射線単位測定委員会(ICRU)が導入した実用量(operational quantity)への換算係数である。外部被ばく線量評価は通常、実用量に基づいて行われる。したがって、外部被ばく線量の管理実務上重要なのは、実用量への換算係数である。本報告では、まず Publ. 74 で勧告された実用量への換算係数について現行法令の1 cm 線量当量への線量換算係数と比較し、次にこれらを法規制及び管理実務へ適用する場合の主な検討課題についてまとめる。

2. ICRP Publication 74 における実用量への換算係数

Publ. 74 で線量換算係数が勧告されたのは、光子、中性子及び電子についてであり、対象となる実用量は、周辺線量当量($H^*(d)$)、方向性線量当量($H'(d, \alpha)$)及び個人線量当量($H_p(d)$)である。Publ. 51³⁾では示され

なかった電子に対する換算係数及び $H_p(d)$ への換算係数が与えられていることが今回の特徴である。ただし、 $H_p(d)$ については、厳密には $H_p(d)$ そのものへの換算係数ではなく、“ICRU 組織等価物質* でできた $30 \times 30 \times 15$ cm のスラブファントム中の中心軸上深さ d における線量当量, $H_{p,slab}(d, \alpha)$ (α : 入射角度)” への換算係数である。この $H_{p,slab}(d, \alpha)$ は、ICRU Report 47⁴⁾で勧告された個人線量計校正のための基準線量当量にあたる。

2.1 光 子

換算係数が示されているのは、 $H^*(10)$, $H'(10, \alpha)$ 及び $H'(0.07, \alpha)$ ($\alpha: 0^\circ \sim 180^\circ$)、並びに $H_{p,slab}(10, \alpha)$ 及び $H_{p,slab}(0.07, \alpha)$ ($\alpha: 0^\circ \sim 75^\circ$) についてである。エネルギー範囲は、 $H_{p,slab}(0.07, \alpha)$ については 5 keV~1 MeV、それ以外は 10 keV~10 MeV である。第1図に、空気カーマ(K_a) から $H^*(10)$ 及び $H_{p,slab}(10, 0^\circ)$ への換算係数を現行の1 cm 線量当量(H_{1cm})への換算係数と比較して示す。 $H^*(10)/K_a$ については、現行の換算係数よりも 500 keV 以上で最大2%高い値となっている。また、 $H_{p,slab}(10, 0^\circ)/K_a$ については、ファントム形状の差から、100 keV 付近で $H^*(10)/K_a$ よりも最大10%高い値となっている。

^{*1} 日本原子力研究所保健物理部; 茨城県那珂郡東海村白方白根 2-4 (〒319-1195)

Department of Health Physics, Japan Atomic Energy Research Institute; Tokai-mura, Naka, Ibaraki 319-1195, Japan.

* ICRU 組織等価物質は、密度が 1 g/cm^3 で、質量組成が水素 10.1%, 炭素 11.1%, 窒素 2.6% 及び酸素 76.2% の物質である。

第1図 光子に対する空気カーマから実用量への換算係数の比較

$H^*(10)$ ：周辺線量当量への新しい換算係数
 $H_{p,slab}(10,0^\circ)$ ：個人線量当量への新しい換算係数
 H_{1cm} ：現行の1 cm 線量当量への換算係数

第2図 中性子に対するフルエンスから実用量への換算係数の比較

$H^*(10)$ ：周辺線量当量への新しい換算係数
 $H_{p,slab}(10,0^\circ)$ ：個人線量当量への新しい換算係数
 H_{1cm} ：現行の1 cm 線量当量への換算係数

2.2 中性子

換算係数は、 $H^*(10)$ 及び $H_{p,slab}(10, \alpha)$ ($\alpha: 0^\circ \sim 75^\circ$) について示されている。エネルギー範囲は、 $H^*(10)$ については 1 MeV～201 MeV, $H_{p,slab}(10, \alpha)$ については 1 MeV～20 MeV である。第2図に、中性子フルエンス (Φ) から $H^*(10)$ 及び $H_{p,slab}(10, 0^\circ)$ への換算係数を現行の H_{1cm} への換算係数と比較して示す。新しい換算係数は、現行の値よりも $H^*(10)/\Phi$ で最大1.35倍、 $H_{p,slab}(10, 0^\circ)/\Phi$ で最大1.5倍高い値となっている。これは、ICRP 1990年勧告で線質係数の定義 ($Q(L)-L$ 関

第3図 電子に対するフルエンスから方向性線量当量 $H'(d, 0^\circ)$ への換算係数 (個人線量当量 $H_{p,slab}(d, 0^\circ)$ への換算係数も同じ値である。)

係) が変更された影響が大きい。

2.3 電子

線量換算係数は、 $H'(d, \alpha)$ ($d=0.07, 3, 10$ mm, $\alpha: 0^\circ \sim 89^\circ$) について示されている。エネルギー範囲は 70 keV～10 MeV である。第3図に $\alpha=0^\circ$ のときのフルエンス (Φ) から $H'(d, 0^\circ)$ への換算係数 ($H'(d, 0^\circ)/\Phi$) を示す。電子の飛程は ICRU 球[†]の半径よりも十分小さく、またスラブと球との幾何学形状の差は無視できるため、 $H'(d, \alpha)/\Phi$ は $H_{p,slab}(d, \alpha)$ への換算係数としても使用できる。

3. 新しい線量換算係数の適用における課題と問題点

Publ. 74 で示された新しい線量換算係数を放射線管理へ適用する場合に検討すべき主な課題及び問題点として、(1) 法規制への適用における検討課題、(2) 中性子線量換算係数の適用における検討課題、(3) 電子線量換算係数の適用における問題点、及び (4) 線量計校正実務への適用における問題点について述べる。

3.1 法規制への適用における検討課題

我が国の現行法令で導入されている1 cm 線量当量、3 mm 線量当量及び70 μ m 線量当量(以下、1 cm 線量当量 (H_{1cm}) 等と略す) への換算係数は光子及び中性子について示されており、その値は Publ.51 の“ICRU 球に面平行ビームとして入射した場合の主軸上の深さ0.07, 3及び10 mmにおける線量当量” ($H^*(d)$ に相当) へのものと同じである。Publ. 74では、 $H^*(d)$ に加えて $H'(d, \alpha)$ 及び $H_{p,slab}(d, \alpha)$ への換算係数が示された。また、光子の3 mm、中性子の0.07, 3 mmについては値

[†] ICRU 組織等価物質でできた直径30 cmの球。 $H^*(d)$ 及び $H'(d, \alpha)$ はこのICRU球で定義されている。

が示されていない。このため、現行法令の換算係数を新しい換算係数でそのまま置き換えるわけにはいかない。そこで、(1) 法令で採用すべき換算係数をどれにするか、(2) 換算係数がない深さをどう取り扱うか、を検討する必要がある。

3.1.1 法令で採用すべき換算係数

これを考えるためには、まず1 cm線量当量等をどうするかを検討する必要がある。法令では、場のモニタリングでも個人モニタリングでも同じ用語が用いられている。しかし、ICRUは場のモニタリング量と個人モニタリング量を区別して定義しており、Publ. 74では換算係数も両者について示される。では、法令においてどうすべきか。選択肢は以下の3つである。

- ① 1 cm線量当量等を場のモニタリング量と個人モニタリング量の総称とする。

一法令上は用語を区別せず、従来どおり外部被ばくに係る線量当量はすべて1 cm線量当量等と呼ぶ。ただし、実務上、サーベイメータ等は $H^*(d)$ 又は $H'(d, \alpha)$ で、個人線量計は $H_{p,slab}(d, \alpha)$ で校正する。

- ② 場のモニタリング量と個人モニタリング量を区別する。

一法令上で用語を区別する。線量計の校正でも当然両者を使い分ける。

- ③ 1 cm線量当量等は一義的なもの(例えば $H^*(d)$)とする。

一換算係数は一つとなり、サーベイメータ等と個人線量計を同じ基準量で校正する。

③は国際規格等との整合がとれない。②は確かに正当な方法である。しかし、法令上、モニタリング量は線量

限度と比較するための量であるという点からは、実用量はすべて同じ意味を持つ。この観点から、用語を区別するのは法令を複雑にしすぎると考える。したがって、法令上は①がよいと考える。この選択は定義の曖昧さを残す。しかし、実務上は、マニュアル等を整備することで対応可能であろう。

では、法令における換算係数はどれを採用すべきか。換算係数を必要とする状況は、①遮へい計算など計算・評価を行う場合、②線量計が有すべきエネルギーレスポンス等の基準を示す場合、③線量計の校正基準量を求める場合の3つである。②及び③はJISの役割である。したがって、法令では①の場合に用いる換算係数を示せばよい。計算・評価に用いる量を何にすべきかは大いに議論のあるところであろう。しかし、施設検査などにおけるサーベイメータ等による実測値との対応、現行との継続性から、従来どおり周辺線量当量に対する換算係数を示すのが妥当ではないかと考える。

3.1.2 換算係数がない深さの取扱い

Publ. 74では、光子の3 mm、中性子の0.07 mm及び3 mmについては線量換算係数が示されていない。深さ3 mmで規定されるモニタリング量(眼の水晶体が対象)への換算係数がないのは、 $H_p(10)$ (又は $H^*(10)$) 及び $H_p(0.07)$ (又は $H'(0.07)$) で実効線量限度及び皮膚の線量限度が担保されていれば、一般に眼の水晶体の線量限度も担保されるからである。また、中性子は強透過性放射線であるため、深さ0.07 mm(皮膚)に対するモニタリングは必要ない。一方、現行法令の個人モニタリングに関する規定では、胸部(又は腹部)において常に70 μ m線量当量及び3 mm線量当量の測定を義務づけている。この点について合理化を図る必要があろう。

第1表 新しい中性子線量換算係数による線量当量の変化

線源・施設の種類 (評価データ数)	スペクトル平均線量換算係数の比	
	$H^*(10)/H_{1cm}^{*1}$	$H_{p,slab}(10, 0^\circ)/H_{1cm}^{*1}$
$^{241}\text{Am-Be}$ 線源(1)	1.07	1.13
^{252}Cf 線源(1)	1.13	1.18
$^{252}\text{Cf}(\text{D}_2\text{O}$ 減速)(1)	1.16	1.22
原子炉周辺(3)	1.25~1.26 ^{*2}	1.31~1.32 ^{*2}
核燃料取扱施設(8)	1.15~1.19 ^{*2}	1.20~1.23 ^{*2}
医療用ライナック(4)	1.14~1.22 ^{*2}	1.20~1.26 ^{*2}
核融合実験装置(3)	1.13~1.21 ^{*2}	1.17~1.27 ^{*2}

^{*1} $H^*(10)$: 新しい換算係数による周辺線量当量, $H_{p,slab}(10, 0^\circ)$: 新しい換算係数による個人線量当量, H_{1cm} : 現行の換算係数による1 cm線量当量

^{*2} 複数評価された値の最小値と最大値の範囲

3.2 中性子線量換算係数の適用における検討課題

中性子の線量換算係数が現行のものよりも高くなったため、中性子の線量当量が現在の値より高くなる。また、線量換算係数の変更は、線量計が有するべきエネルギーレスポンスの基準が変化したことを意味する。さらに、実用量が実効線量を過小評価するエネルギー領域が存在する。したがって、(1) 中性子利用施設でどの程度線量当量が高くなるか、(2) 既存の中性子線量計が使用可能か、(3) 実用量を用いて中性子の外部被ばく線量の管理を行ってよいか、を評価・検討する必要がある。

3.2.1 実際の施設における中性子線量当量の変化

RI 中性子源や原子力施設等における実際の中性子スペクトルデータを用いて、新しい線量換算係数を用いた場合どの程度線量当量が高くなるかを評価した。評価したのは7種類の線源及び施設である(第1表参照)。施設における中性子スペクトルとして、IAEAのスペクトルデータ集⁵⁾からスペクトル形状が異なるものを3~8個ずつ選んだ。これらのスペクトルデータを用いて、現行の1 cm 線量当量 (H_{1cm})、周辺線量当量 ($H^*(10)$) 及び個人線量当量 ($H_{p,slab}(10, 0^\circ)$) へのスペクトル平均線量換算係数を計算し、これらの比 ($H^*(10)/H_{1cm}$ 及び $H_{p,slab}(10, 0^\circ)/H_{1cm}$) を求めた。結果を第1表に示す。これを見ると、 $H^*(10)$ で7~26%、 $H_{p,slab}(10, 0^\circ)$ で13~32%現在より線量が高くなることがわかる。したがって、中性子が発生する施設においては、管理区域境界等における線量の再評価が必要になるかもしれない。しかし、昭和63年の法令改正時における行政指導(中性子線質係数が2倍になっても線量当量限度を超えないように努めること)⁶⁾で想定された中性子線量が2倍という結

第4図 中性子サーバイメータ(レムカウンタ)のレスポンスと線量当量レスポンスの比較の例 (Studsvik 2202D の場合)

果にはならない。

3.2.2 既存の中性子線量計の対応

既存の中性子用のサーバイメータや個人線量計のエネルギーレスポンスは、 $\gamma(X)$ 線用のものに比べて良好ではない。第4図に中性子線量当量直読式サーバイメータ(レムカウンタ)のエネルギーレスポンスを現行の H_{1cm} レスポンス及び新しい $H^*(10)$ レスポンスと比較した例を示す。このように線量計のエネルギーレスポンスの現状を考えると、既存の線量計については校正定数の変更など比較的軽微な対応で十分ではないかと考えられる。この問題についてはさらに線量計ごとの検討が必要である。

3.2.3 実用量と実効線量との関係

外部被ばく線量の管理に実用量を用いるためには、実

第2表 中性子スペクトルを考慮した実効線量と周辺線量及び個人線量当量の比

線源・施設の種類 (評価データ数)	スペクトル平均線量換算係数の比	
	$E(AP)/H^*(10)^{*1}$	$E(AP)/H_{p,slab}(10, 0^\circ)^{*1}$
²⁴¹ Am-Be 線源(1)	1.05	1.00
²⁵² Cf 線源(1)	0.88	0.84
²⁵² Cf(D ₂ O 減速)(1)	0.91	0.87
原子炉周辺(3)	0.67~0.76 ^{*2}	0.64~0.73 ^{*2}
核燃料取扱施設(8)	0.79~0.87 ^{*2}	0.76~0.84 ^{*2}
医療用ライナック(4)	0.72~0.94 ^{*2}	0.69~0.90 ^{*2}
核融合実験装置(3)	0.83~0.87 ^{*2}	0.79~0.83 ^{*2}

^{*1} $E(AP)$: 前方-後方照射に対する実効線量, $H^*(10)$: 周辺線量当量, $H_{p,slab}(10, 0^\circ)$: 個人線量当量

^{*2} 複数評価された値の最小値と最大値の範囲

用量が実効線量を安全側に評価できることが必要である。しかし、新しい線量換算係数を比較すると、一部のエネルギー領域（約1 eV～40 keV, 3～13 MeV 及び 40 MeV 以上）で実用量が実効線量を過小評価する。ただし、これは単色エネルギーの場合であり、幅広いエネルギースペクトルを有する実際の施設における両者の関係を評価する必要がある。そこで、3.2.1と同じ中性子線源及び施設における中性子スペクトルデータを用いて、実用量 ($H^*(10)$, $H_{p,slab}(10, 0^\circ)$) 及び最も線量が高くなる前方-後方照射に対する実効線量 ($E(AP)$) へのスペクトル平均線量換算係数を計算し、その比 ($E(AP)/H^*(10)$ 及び $E(AP)/H_{p,slab}(10, 0^\circ)$) を求めた。結果を第2表に示す。比は Am-Be 線源を除いて1より小さく、実用量が実効線量を安全側に評価可能であることを示している。この理由は、実用量が実効線量を安全側に評価するエネルギー領域（40 keV～3 MeV）の線量への寄与の方が、実用量が過小評価するエネルギー領域の寄与を上回るためである。したがって、RI 中性子源や原子力施設のほとんどで実用量を用いることに問題はない。しかし、高エネルギー加速器周辺等では実用量が実効線量を過小評価する可能性があるので、測定する場の中性子スペクトルを確認しておくことが重要であろう。

3.3 電子線量換算係数の適用における問題点

Publ. 74 で示されている電子の線量換算係数は、単色エネルギーに対するものである。電子 (β 線) の外部被ばく線量評価で単色エネルギーに対する換算係数を用いることはまれであり、通常は β 線スペクトルを考慮した核種別のデータが必要である。そこで、 β 線の線量評価に用いるデータとしては、ICRU Report 56⁷⁾ に収録されている線量換算係数の方が有効であろう。このレポートには、核種別のフルエンス-線量当量^{*}換算係数の他、皮膚汚染を想定した放射能面密度からの換算係数など有用なデータが数多く収録されている。

3.4 線量計校正実務への適用における問題点

実用量への換算係数は、線量計の校正を行う際、トレーサビリティを有する照射線量等の物理量から基準線量当量を算出する上で重要なデータである。ISO (国際標準化機構) や IEC (国際電気標準会議) の国際規格では、既に $H^*(d)$, $H'(d, \alpha)$ 及び $H_{p,slab}(d, \alpha)$ が導入されてきている。また、Publ. 74 で示された新しい線量換算係数も採用されつつある。したがって、関係法令の改正のタイミングも関係するが、我が国においても、 $H^*(d)$ に加えて $H'(d, \alpha)$ 及び $H_{p,slab}(d, \alpha)$ を校正体系に導

入していく必要があろう。この場合、被校正器が場のモニタリング用 (サーバイメータ等) か、個人モニタリング用 (個人線量計) かで、基準線量当量 (率) ($H^*(d)$, $H'(d, \alpha)$, $H_{p,slab}(d, \alpha)$) を算出するために用いる換算係数を使い分けなければならない。また、 $H'(d, \alpha)$ 及び $H_{p,slab}(d, \alpha)$ を導入すると、線量計の方向依存特性試験では角度別に基準線量当量 (率) を算出する必要がある。したがって、校正実務者は新しい線量換算係数に対する正しい理解が必要である。現在の実用量の体系は、校正実務にとって極めて煩雑かつ複雑なものになっている。

4. ま と め

Publ. 74 で示された実用量への新しい換算係数の主な特徴は、個人線量当量への換算係数が示されたこと及び中性子の線量換算係数が現行より高くなったことである。

個人線量当量への換算係数が与えられたことにより、これまで我が国では区別がなかった場のモニタリング量と個人モニタリング量を管理測定 の立場でどう体系化し適用するかを議論する必要がある。特に、線量計の校正実務では、校正に使用すべきファントムの選択も含めてこの問題を早急に検討し議論する必要がある。

新しい中性子線量換算係数は、単色エネルギーでは現行よりも最大1.5倍高い値となっている。また、実用量が実効線量を過小評価するエネルギー領域が存在する。しかし、実際の原子力施設等における中性子スペクトルを考慮すると、中性子線量当量の増加は10～30%程度であり、また、外部被ばく線量の管理に実用量を用いることに問題はない。しかし、20 MeV 以上の高エネルギー中性子が存在する加速器施設等では、実用量の適用そのものの問題も含めて外部被ばくモニタリングに関するより一層の検討が必要である。

参 考 文 献

- 1) ICRP ; ICRP Publication 60 (1991).
- 2) ICRP ; ICRP Publication 74 (1996).
- 3) ICRP ; ICRP Publication 51 (1987).
- 4) ICRU ; ICRU Report 47 (1992).
- 5) IAEA ; Technical Report Series No. 318 (1990).
- 6) 科学技術庁原子力安全局放射線安全課長通知；国際放射線防護委員会新勧告 (ICRP Pub. 26) の取入れによる放射線障害防止法関係法令の改正について (通知) (1988).
- 7) ICRU ; ICRU Report 56 (1997).

^{*} ICRU Report 56 の換算係数は吸収線量 (Gy) へのものである。しかし、電子の場合、吸収線量と線量当量は等しい。